

# 第十五章

# 量子物理

The background of the slide is a deep blue gradient. In the center, there is a glowing, abstract representation of a quantum system, possibly an atom or a particle's wave function. It consists of a bright blue point of light at the center, with several concentric, glowing blue rings or orbits around it. These rings are intersected by a network of thin, white, curved lines that form a complex, web-like structure. The overall effect is one of high-tech, scientific sophistication.

# 主要内容:

**§15-1 黑体辐射 普朗克能量量子假设**

**§15-2 光电效应 光的波粒二象性**

**§15-3 康普顿效应**

**§15-4 氢原子的玻尔理论**

**§15-5 弗兰克-赫兹实验**

**§15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性**

**§15-7 不确定关系**

**§15-8 量子力学简介**

**§15-9 氢原子的量子理论简介**

**§15-10 多电子原子中的电子分布**

## 基本要求:

1. 掌握描述黑体热辐射的两个物理量（单色辐出度、总辐出度）定义及其关系，两个实验定律（斯特藩—玻尔兹曼定律、维恩位移定律）。
2. 理解能量子、光子的概念。
3. 理解光电效应中截止频率、遏止电压、逸出功、饱和电流的概念，会用爱因斯坦方程解释光电效应。
4. 掌握康普顿散射实验中能量守恒定律、动量守恒定律，牢记康普顿公式、会求散射光波长、反冲电子的动能、动量及反冲方向。
5. 掌握氢原子光谱实验（巴尔末系等谱线系的波数公式）。
6. 氢原子玻尔理论的三个假设，定态轨道、角动量量子化、能级跃迁；会计算谱线波长、轨道半径、能级（基态、激发态、自由态、电离能）。
7. 掌握德布罗意公式，求已知动量（动能）的微观粒子的德布罗意波长（非相对论、相对论两种情况）。
8. 理解不确定关系的物理含义，在已知微观粒子位置（动量）的不确定度时，会求动量（位置）的不确定度。
9. 掌握波函数的统计意义、标准条件，会计算微观粒子在空间某处出现的概率密度或在某个范围内的概率。
10. 掌握一维自由粒子的波函数。
11. 理解薛定谔方程的性质，了解含时薛定谔方程和定态薛定谔方程的关系，理解定态薛定谔方程的性质。
12. 掌握求解一维无限深势阱的定态薛定谔方程，获得本征能量、本征波函数，粒子在势阱中位置的概率分布。了解隧穿效应波函数、穿透几率等特点。
13. 掌握描述氢原子核外电子状态的四个量子数，判断量子数的取值范围，并会求相应的能量、轨道角动量、自旋角动量及其在磁场方向的投影。

# §15-1 黑体辐射 普朗克能量量子假设

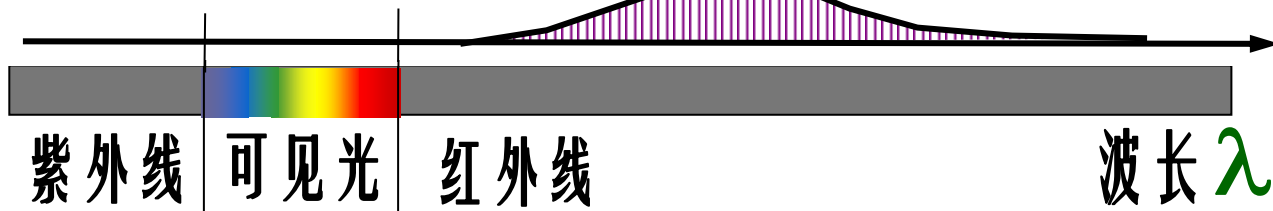
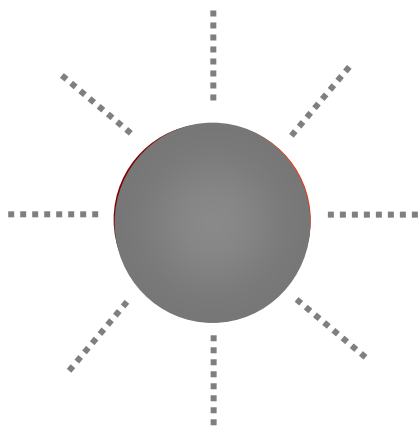
## 一 黑体辐射

### 1. 热辐射的基本概念

任何物体，在任何温度下，都要发生电磁波。这种由于物体中的分子、原子受到热激发而发射电磁辐射的现象，称为**热辐射**。

温度逐渐下降

曲线覆盖面积示意单位时间、单位面积  
发射的各种波长的总辐射能



**(1) 辐射出射度（辐出度）**：单位时间，从物体单位表面积上所辐射出的各种波长的电磁波的能量总和。

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda \quad \text{单位：W} \cdot \text{m}^{-2}$$

**(2) 单色辐射出射度（单色辐出度）**：单位时间，单位面积发出的波长在 $\lambda$ 附近单位波长范围内的电磁波的能量。

$$M_{\lambda}(T) \quad \text{单位：W} \cdot \text{m}^{-3}$$

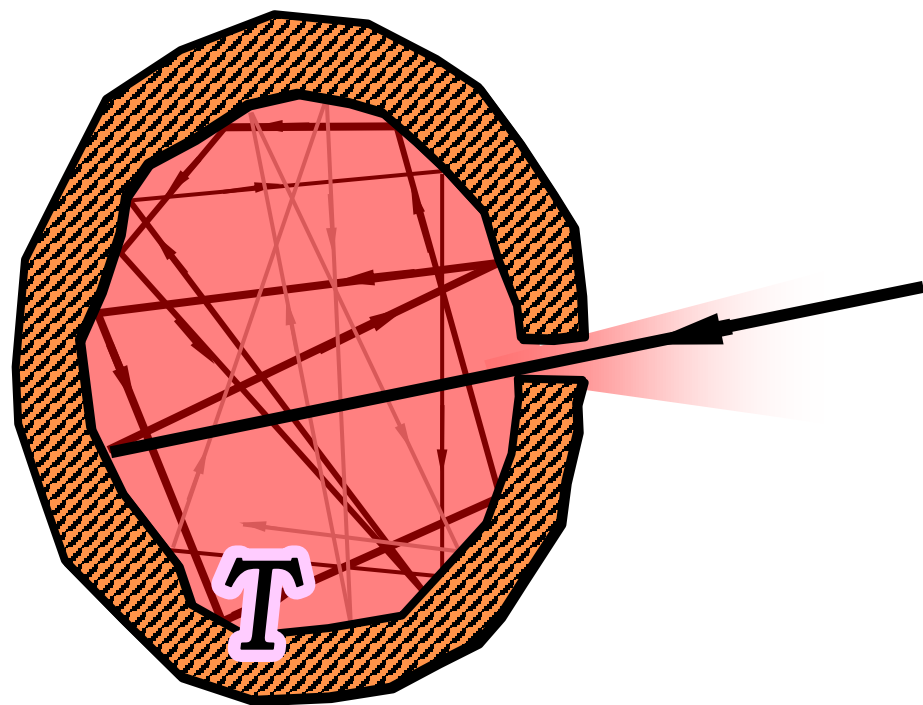
- 物体在某个频率范围内发射电磁波能力越大，则它吸收该频率范围内电磁波能力也越大。

## 2. 黑体

若物体在任何温度下，能吸收一切外来的电磁辐射，则称此物体为**黑体**（**绝对黑体**）。

黑体是一种理想模型。

黑体的实验模型：



对空腔加热  
至某热平衡温度

### 3. 黑体辐射的基本规律

#### 总辐出度

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4$$

斯特藩 - 玻耳兹曼定律

式中

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

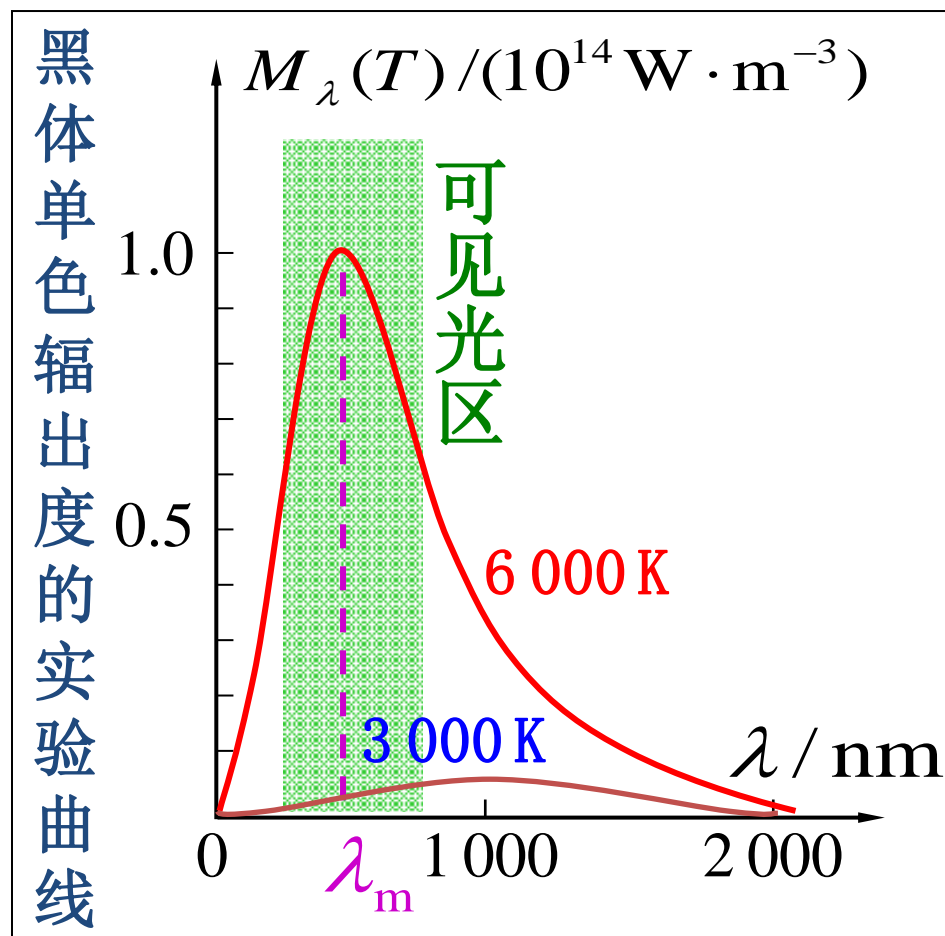
斯特藩 - 玻耳兹曼常数

峰值波长  $\lambda_m$

$$\lambda_m T = b$$

——维恩位移定律

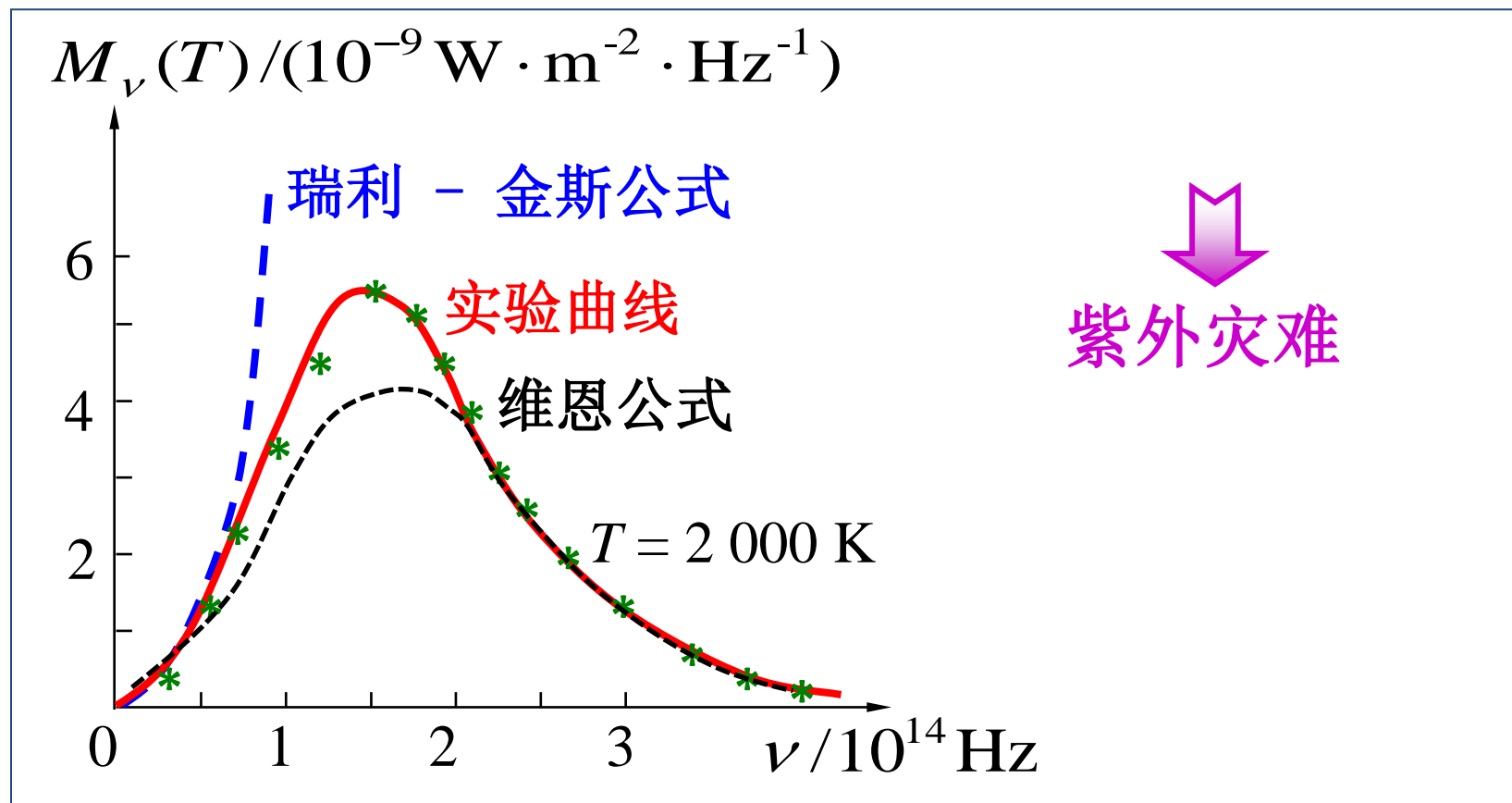
常量  $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$



## 4. 经典物理的困难

维恩公式  $M_\nu(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$

瑞利—金斯公式  $M_\nu(T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} kT$

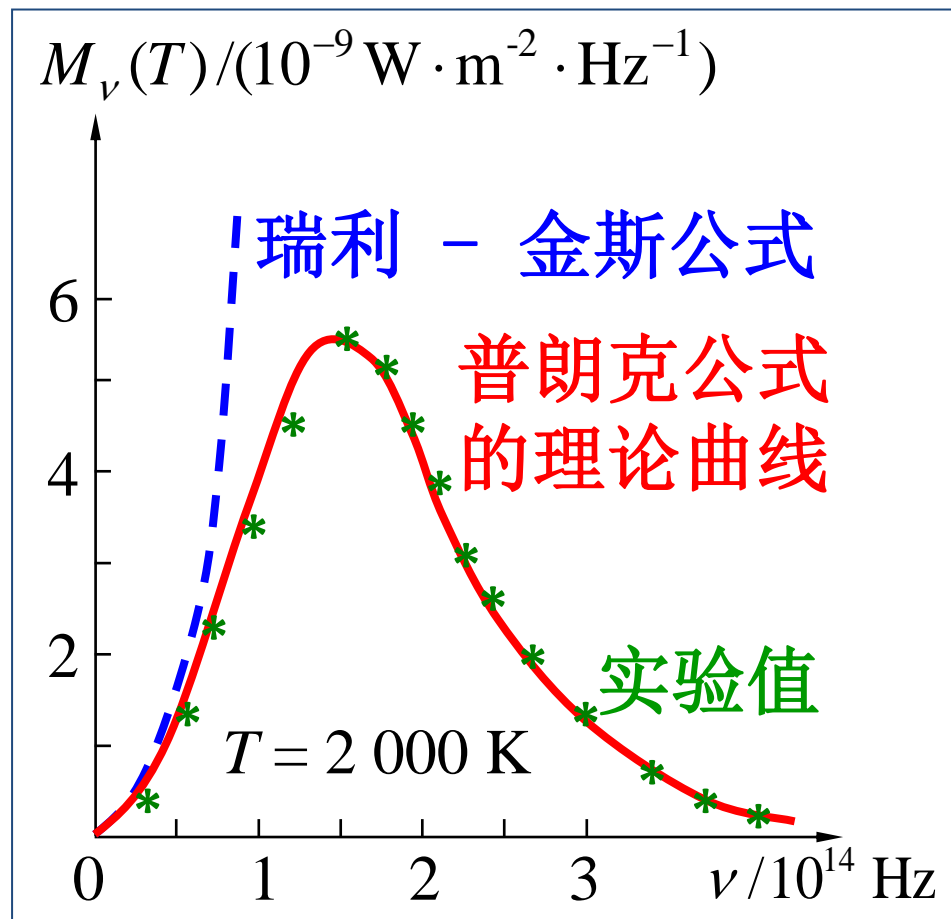




## 二 普朗克能量量子假设

### 1. 普朗克黑体辐射公式

$$M_\nu(T)d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



普朗克(1858-1947)

## 2. 普朗克量子假设

1900年12月24日，普朗克在《关于正常光谱的能量分布定律的理论》一文中提出能量量子化假设，量子论诞生。

- 黑体中的分子、原子的振动可看作谐振子；
- 这些谐振子和空腔中的辐射场相互作用过程中吸收和发射的能量是**不连续的**，只能取一些分立值，为某一能量最小值的整数倍，即 $\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots, n\varepsilon$ ；
- 频率为 $\nu$ 的谐振子，吸收和发射能量的最小值 $\varepsilon = h\nu$ 称为**能量子**（或**量子**）， $n$ 为量子数

$$\varepsilon' = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

普朗克常数  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

# §15-2 光电效应 光的波粒二象性

## 1. 光电效应实验的规律

光束射到金属表面使电子从金属中逸出的现象称为**光电效应**。

$$U_0 = k\nu - U_\alpha$$

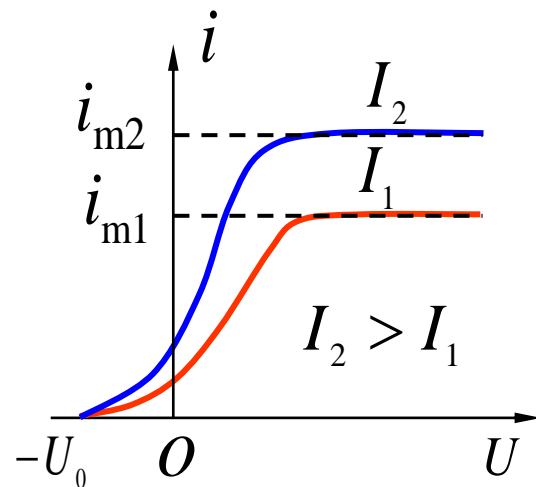
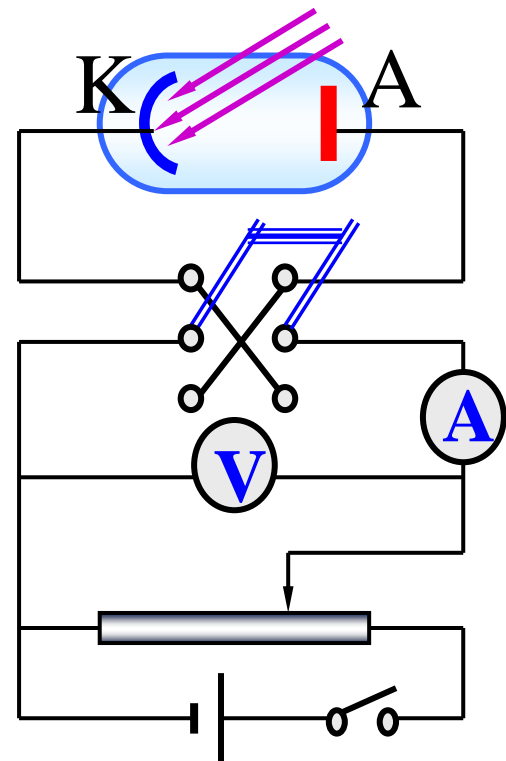
与材料无关  
的普适量

与材料有  
关的常量

## 2 爱因斯坦光电效应方程

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

逸出功与  
材料有关



### 3 光的波粒二象性

(1) 波动性：光的干涉和衍射

(2) 粒子性：  $E = h\nu$ （光电效应等）  $I = nh\nu$

◆ 相对论能量和动量关系  $E^2 = p^2c^2 + E_0^2$

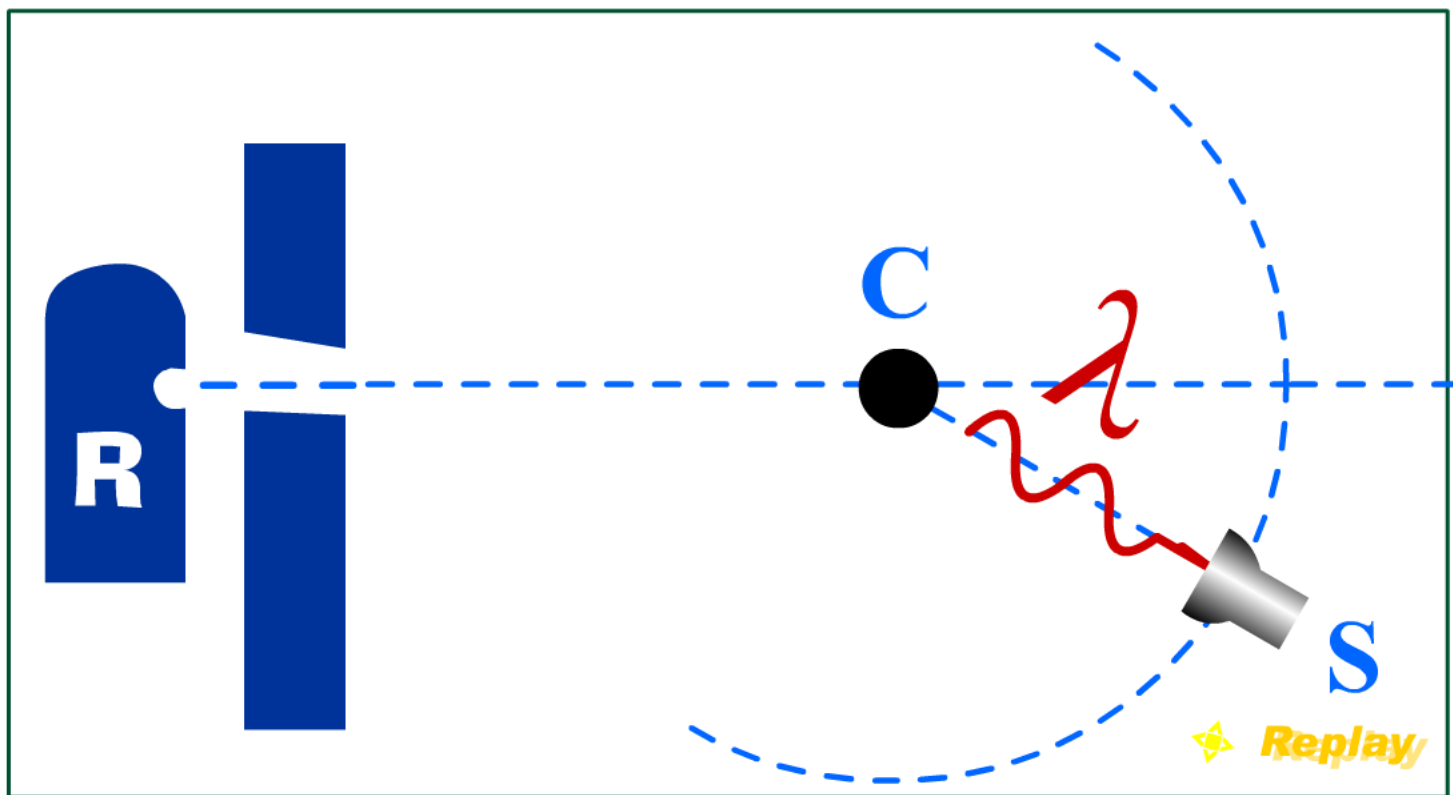
◆ 光子  $E_0 = 0$ ,  $E = pc = h\nu$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

描述光的  
粒子性  $\left\{ \begin{array}{l} E = h\nu \\ p = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right\}$  描述光的  
波动性

## § 15-3 康普顿效应

### 1. 实验装置



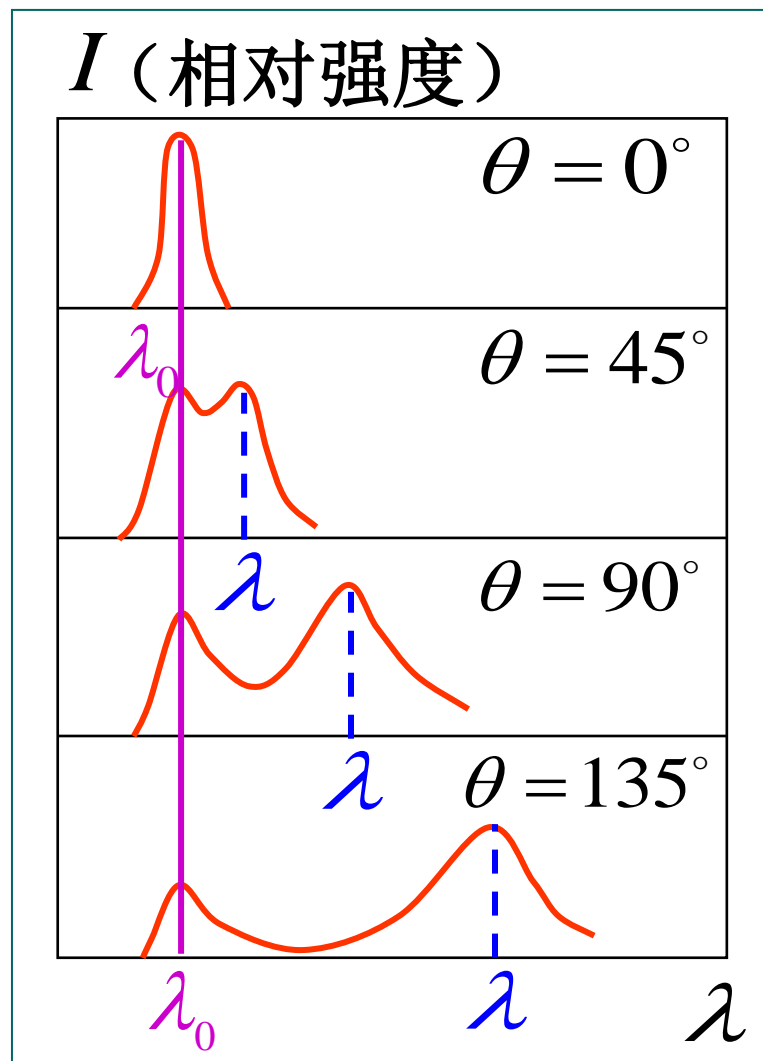
## 2. 实验结果

1) 散射束中除了有与入射束波长  $\lambda_0$  相同的射线，还有波长  $\lambda > \lambda_0$  的射线。

——康普顿效应

2) 波长的偏移 ( $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ ) 与散射角  $\theta$  有关， $\theta$  越大， $\Delta\lambda$  越大。

3)  $\Delta\lambda$  与散射物质无关。



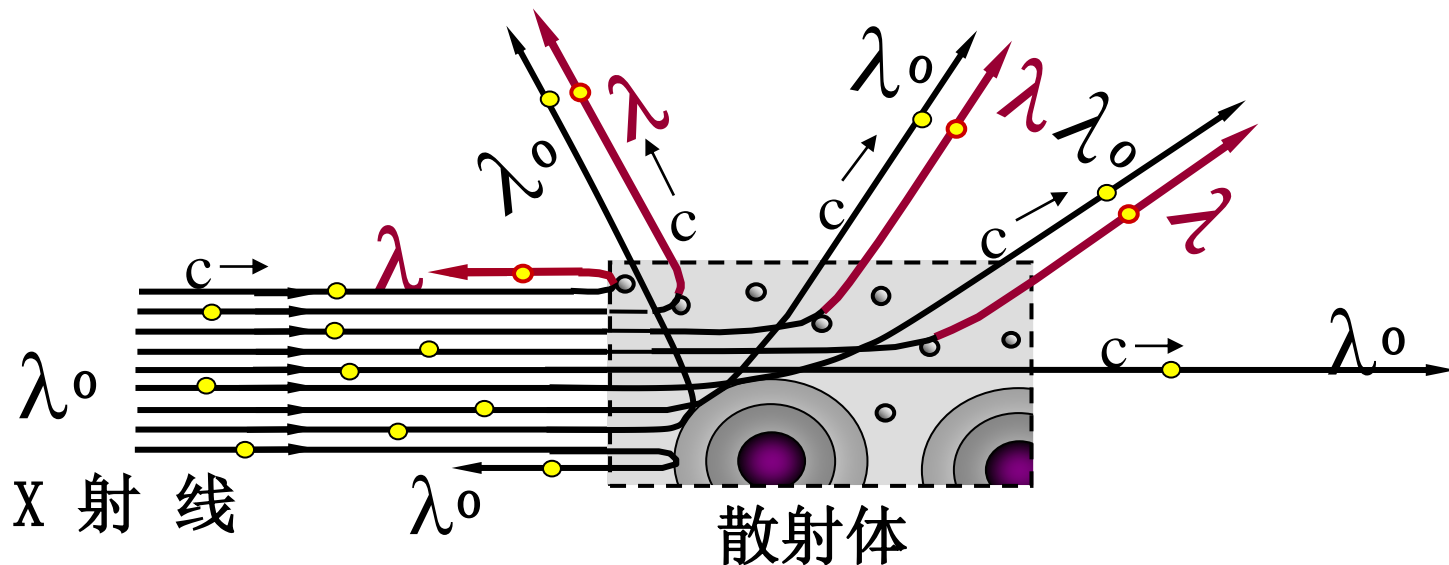
### 3. 康普顿效应的量子解释

#### 1) 定性解释

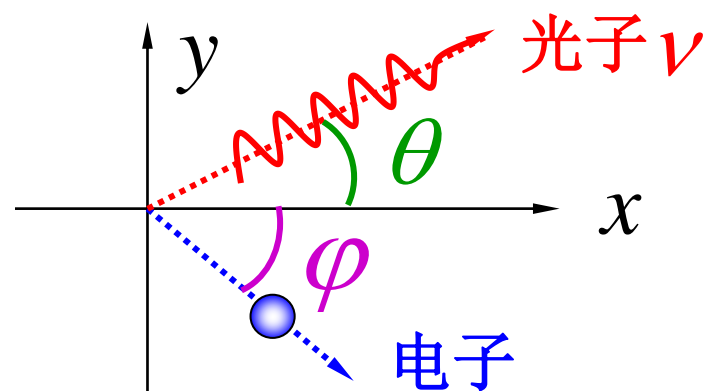
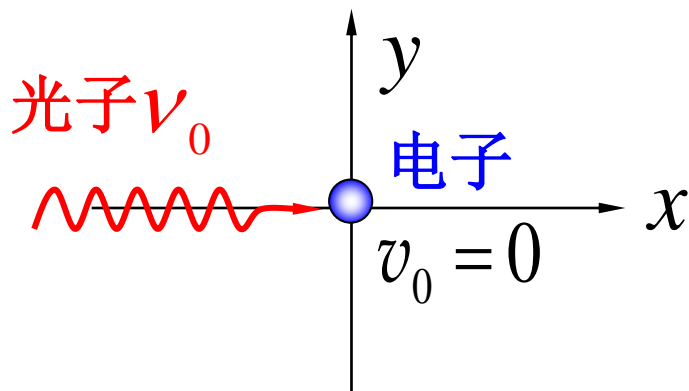
- 散射线中的  $\lambda > \lambda_0$  成分是光子与外层电子发生弹性碰撞的结果。

光子一部分能量传给电子，散射光子能量减少，频率下降、波长变大。

- 散射线中的  $\lambda_0$  成分是光子与内层电子发生弹性碰撞的结果。（相当于与原子实碰撞）



## 2) 定量解释



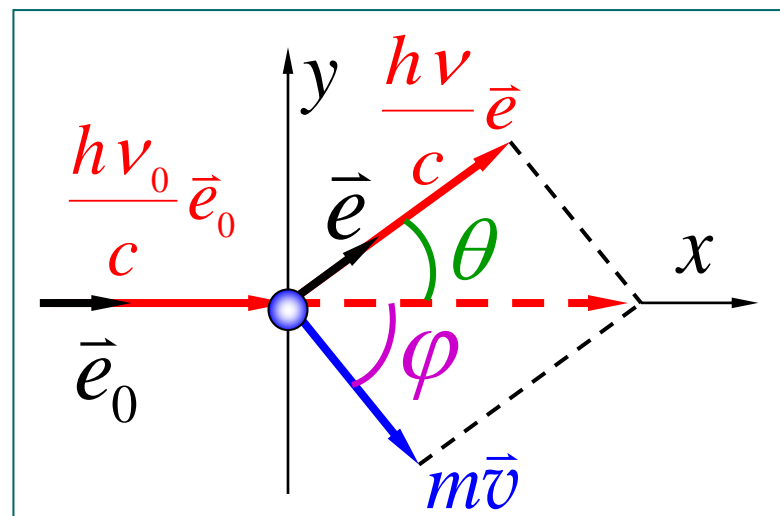
- ◆ 电子热运动能量  $\ll h\nu$ ，可近似为**静止电子**。
- ◆ 固体表面电子束缚较弱，视为**近自由电子**。
- ◆ 电子反冲速度很大，用**相对论力学**处理。

能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c} \vec{e}_0 = \frac{h\nu}{c} \vec{e} + m\vec{v}$$





◆ 康普顿公式

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

◆ 康普顿波长

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

### 3) 结论

- $\Delta\lambda$  随  $\theta$  增大而增大，与散射物质无关.

$$\theta = 0, \Delta\lambda = 0 \quad \theta = \pi, (\Delta\lambda)_{\max} = 2\lambda_c$$

- 光子与原子实碰撞:  $\Delta\lambda = \frac{h}{Mc} (1 - \cos \theta)$

$$10^{-16} \sim 10^{-19} \text{ m}$$

- 只有短波长入射光康普顿效应才明显.

$$\text{X射线: } 10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m; } \gamma \text{ 射线: } < 10^{-12} \text{ m}$$

思考: 1). 为什么 $\Delta\lambda$  与散射物质无关?

(散射物中的电子看成自由电子)

2). 康普顿波长的物理意义  $\lambda_C = \frac{h}{m_0 c}$

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda_C} = m_0 c^2$$

若一个光子的能量在数值上等于一个电子的静能量时, 该光子的波长在数值上等于康普顿波长.

3). 观察“光电效应”时能否见到康普顿效应?

只有短波长入射光康普顿效应才明显.

X射线:  $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}$ ;  $\gamma$  射线:  $< 10^{-12} \text{ m}$

## 4. 物理意义

- 1) 实验上证实了光子确实有一定的质量、动量和能量——光具有粒子性.
- 2) 微观粒子的相互作用严格遵守相对论及能量守恒和动量守恒定律.
- 3) 证明了量子论正确性，狭义相对论力学的正确性.

康普顿因发现康普顿效应而获得了1927年诺贝尔物理学奖

**例1** 波长  $\lambda_0 = 1.00 \times 10^{-10} \text{ m}$  的 X 射线与静止的自由电子作弹性碰撞，在与入射角成  $90^\circ$  角的方向上观察， **问：**

- (1)** 散射波长的改变量  $\Delta\lambda$  为多少？
- (2)** 反冲电子得到多少动能？
- (3)** 在碰撞中，光子的能量损失了多少？

## 今日作业：15-8； 15-10； 15-14； 15-15

**15-8** 天狼星的温度大约是 $11000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .试由维恩位移定律计算其辐射峰值的波长.

**15-10** 太阳可看作是半径为 $7.0 \times 10^8\text{m}$ 的球形黑体，试计算太阳的温度.设太阳射到地球表面上的辐射能量为 $1.4 \times 10^3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，地球与太阳间的距离为 $1.5 \times 10^{11}\text{m}$ .

**15-14** 一具有 $1.0 \times 10^4\text{eV}$ 能量的光子，与一静止的自由电子相碰撞，碰撞后，光子的散射角为 $60^{\circ}$ .试问：

- (1) 光子的波长、频率和能量各改变多少？
- (2) 碰撞后，电子的动能、动量和运动方向又如何？

**15-15** 波长为 $0.1\text{nm}$ 的光子入射在碳上，从而产生康普顿效应。从实验中测量到，散射光子的方向与入射光子的方向相垂直.求：

- (1) 散射光子的波长；
- (2) 反冲电子的动能和运动方向。